

Korišćenje ručnog multispektralnog senzora i bespilotne letelice u praćenju razvoja i produktivnosti soje u prirodnim uslovima vlaženja

Nevena Stevanović^{1*}, Nikola Stanković¹, Nataša Ljubičić¹, Mirjana Vukosavljev¹, Aleksa Lipovac², Irina Marina³, Ružica Stričević²

¹Univerzitet u Novom Sadu, BioSens Institut, Dr Zorana Đinđića 1, 21000 Novi Sad, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Nemanjina 6, Beograd 11080, Srbija

³Institut za ekonomiku poljoprivrede, Volgina 15, Beograd 11060, Srbija

*Autor za kontakt: Nevena Stevanović, nevena.stevanovic@biosense.rs

Izvod

Abstract

Soja (*Glycine max L.*) je jedna od vodećih gajenih biljaka na globalnom nivou. Iako je područje Vojvodine povoljno za proizvodnju soje, klima, posebno visoke temperature i neujednačena raspodela padavina, predstavljaju glavni ograničavajući faktor. Cilj ovog rada je da se u uslovima prirodne vlažnosti ispita međuzavisnost između prinosa soje, nivoa vodnog stresa i vegetacionih indeksa dobijenih primenom ručnog multispektralnog senzora i bespilotne letelice na oglednoj parceli na Čeneju, Vojvodina. Rezultati su pokazali značajnu povezanost vegetacionih indeksa sa evapotranspiracijom, promenama vlažnosti zemljišta i prinosom soje. Tokom faze intenzivnog rasta (V4), NDVI-UAV, EVI-UAV i GNDVI-UAV su pokazali visoko značajnu pozitivnu korelaciju sa prinosom ($r=0.96^{**}$, $r=0.94^{**}$, $r=0.86^{*}$). Tokom faze cvetanja (R1), GNDVI-POM je imao značajne pozitivne korelacije sa svim analiziranim parametrima, dok je GNDVI-UAV imao značajne korelacije sa evapotranspiracijom i vlažnošću zemljišta. Tokom faze formiranja mahuna (R3), GNDVI-UAV je ponovo pokazao značajnu korelaciju sa prinosom ($r=0.86^{*}$), dok je NDVI-POM imao značajne korelacije sa evapotranspiracijom i vlažnošću zemljišta. Tokom faze formiranja mahuna (R4), EVI-UAV je pokazao visoko značajne pozitivne korelacije sa evapotranspiracijom, vlažnošću zemljišta i prinosom ($r=0.94^{**}$, $r=0.96^{**}$, $r=0.89^{**}$). Ovi rezultati su korisni za primenu multispektralnih senzora u detektovanju obezbeđenosti soje vodom i unapređenju proizvodnje u uslovima prirodne vlažnosti.

Ključne reči: soja, multispektralni senzor, bespilotna letelica, vegetacioni indeksi, vlažnost zemljišta

Uvod

Introduction

Soja (*Glycine max* L.) jedna je od vodećih gajenih biljaka na globalnom nivou i njena proizvodnja svrstava se na četvrto mesto među svim žitaricama i mahunarkama, nakon pirinča, pšenice i kukuruza (<https://www.fao.org/faostat>; Stepanov et al., 2020). Soja sadrži približno 40-45% proteina i 18-22% biljnih ulja, bogat je izvor vitamina i minerala, sa povoljnim sastavom aminokiselina, što je čini namirnicom pogodnom za ljudsku ishranu (Meseldžija et al., 2020). Takođe, soja je važan izvor bioenergije (Kolarić et al., 2023) i njeno ulje se koristi za proizvodnju biodizela (Worku and Astatkie, 2011). Pored toga, soja poboljšava plodnost zemljišta kada se gaji u rotaciji sa žitaricama, zbog fiksiranja atmosferskog azota iz vazduha putem simbioze sa bakterijama iz roda *Rhizobium* (Zerihun and Haile, 2017). U Srbiji vladaju povoljni zemljišni i klimatski uslovi za gajenje soje (Meseldžija et al., 2020), međutim, glavni ograničavajući faktor za postizanje visokih prinosa predstavlja varijabilnost klimatskih uslova, posebno pojava toplotnih talasa, ekstremno visokih temperatura i neujednačena raspodela padavina. U Srbiji, prosečan prinos zrna soje u prirodnim uslovima snabdevanja vodom u periodu 1965–2003 iznosi 1860 kg·ha⁻¹, tj varira od 920 do 7250 kg·ha⁻¹ (Dragović et al., 2005), i zavisi od količine i raspodele padavina tokom sezone, jer se proizvodnja uglavnom organizuje u uslovima prirodnog vlaženja. Poboljšanje sortimenta soje poslednje dve decenije uticalo je na povećanje prinosa, ali svega do 3400 kg·ha⁻¹ (Maksimović et al., 2005; Pejić et al., 2012; Mandić et al., 2015; Mandić et al., 2017), zbog značajno narušenih trendova pojave padavina u kasno proleće ili tokom letnjeg perioda u kritičnim fazama razvoja soje, kada su i najveće potrebe za vodom (Đukić i sar., 2011; Mandić et al., 2015).

Da bi se dodatno unapredilo praćenje stanja useva i povećali prinosi, danas se sve više koriste istraživanja zasnovana na daljinskom prikupljanju podataka, kao i metode dubokog učenja (deep learning), koje mogu biti od koristi donosiocima odluka u upravljanju usevima (Muruganatham, et al., 2022). Monitoring useva na velikim površinama predstavlja izazov, ali primena tehnologija poput daljinskog posmatranja putem termalnih, multispektralnih ili hiperspektralnih kamera montiranih na dron, avion ili satelit pokazala se korisnim tokom proteklih godina. Vegetacioni indeksi koji se dobijaju merenjem indeksa spektralne refleksije biljaka predstavljaju rezultat daljinskog osmatranja useva i pružaju mogućnost izračunavanja algoritma

za kvantitativnu i kvalitativnu evaluaciju pokrovnosti vegetacije, vitalnosti i dinamike rasta (Xue and Su, 2017), a takođe pomažu u istraživanju prostornih i spektralnih karakteristika useva soje tokom fenološkog ciklusa, kao i faktora koji utiču na njen rast, razvoj i prinos (Zhang et al., 2019, Andrade et al., 2022). Vegetacioni indeksi omogućavaju identifikaciju nedostataka hranljivih materija, stresa usled nedostatka vode, visokih ili niskih temperatura, procenat pokrivenosti zemljišta, dijagnostiku bioloških parametara uključujući i indeks lisne površine (LAI), kao i procenu prinosa (Andrade et al., 2022). Utvđeni su bliski odnosi između prinosa useva i vegetacionih indeksa (Dubrovin et al., 2022), uključujući i indeks lisne površine, koji se koristi kao biološki parameter biljaka i predstavlja ukupnu površinu listova useva na jedinici površine zemljišta (Nguy-Robertson et al., 2012). Normalizovani indeks razlike vegetacije (NDVI) spada među najstarije i najčešće korišćene indekse za praćenje vegetacije koji se široko primenjuje u naučnim istraživanjima, zbog toga što ima potencijalno blizak odnos sa površinom asimilacije biljke i sadržajem hlorofila i prema tome sa produktivnošću useva (Huang et al., 2012; Dubrovin et al., 2022). Pomoću senzora na različitim platformama možemo dobiti vrednosti vegetacionih indeksa, ali je važno imati u vidu da postoje razlike između talasnih opsega koji se koriste za izračunavanje indeksa, kao i da na vrednosti indeksa utiču i drugi faktori kao što su razlike u senzorskim karakteristikama, atmosferski uslovi, ugao osvetljenja i senzora, tip vegetacije i sezonske promene (Rodigheri et al., 2020).

Stoga, cilj ovog rada je da se u uslovima prirodne vlažnosti na zemljištu tipa černoziem sagleda međuzavisnost između prinosa soje, nivoa vodnog stresa i vegetacionih indeksa dobijenih primenom aktivnog optičkog, multispektralnog senzora i multispektralne kamere montirane na besilotnu letelicu.

Materijal i metode

Materials and Methods

Postavka oglada

Experimental setup

Ogled je sproveden na oglednoj parceli površine 28 ha u Čeneju, Vojvodina (45°41'08" N; 19°79'93" E; nadmorska visina 85 m) tokom 2023. vegetacione sezone (slika 1). Klima proučavanog područja je umereno kontinentalna s prosečnom srednjom godišnjom temperaturom vazduha od 11.9°C i godišnjom sumom padavina od 676 mm. Klimatski podaci sa meteorološke

stanice (grafik 1) postavljene na ispitivanoj parceli obuhvatili su minimalne i maksimalne temperature vazduha, vlažnost vazduha, količinu padavina, brzinu i pravac vetra i beleženi su svakodnevno. Na grafiku 1 prikazani su klimatski parametri tokom trajanja eksperimenta, uz poređenje sa višegodišnjim prosečnim vrednostima za period od 1991. do 2020. godine.



Slika 1. Ogledna parcela, Čenej, Vojvodina, Republika Srbija.

Figure 1. Experimental field, Čenej, Vojvodina, Serbia.

Pre setve uzeti su uzorci sa dubine 0-30 cm i 30-60 cm za određivanje hemijskih osobina zemljišta, mehaničkog sastava i kapaciteta zemljišta za vodu. Na ispitivanoj parceli je zastupljeno zemljište tipa černoziem. Prema američkoj klasifikaciji (USDA, 2014) ispitivano zemljište je praškasto glinovita ilovača. Hemijska analiza zemljišta obuhvatila je određivanje aktivne (pH-H₂O) i potencijalne (pH-KCl) kiselosti potenciometrijski pomoću pH-metra, kalcijum-karbonata (CaCO₃), sadržaja humusa po Tyurin IV (1934) metodi, sadržaja ukupnog azota preračunatog iz sadržaja humusa, mineralnog oblika azota (NO₃-N) N-min metodom i amonijačnog oblika azota (NH₄-N) po Nessler-u, sadržaja lakopristupačnog fosfora (Al-P₂O₅) i kalijuma (Al-K₂O) po Egner and Riehm–metodi (1958). Analizom je utvrđeno da zemljište sadrži 0.18% ukupnog azota, 19.98 mg 100·g⁻¹ lakopristupačnog fosfora, 27.45 mg 100·g⁻¹ kalijuma i 3.6% humusa. Sadržaj mineralnog azota u nitratnom obliku iznosi 18.50 mg·kg⁻¹, a u amonijačnom obliku 12.54 mg·kg⁻¹. Izmerena vrednost aktivne kiselosti zemljišta iznosi 7.6, a potencijalne kiselosti 6.7. Sadržaj

kalcijum-karbonata iznosi 2.13%. Vrednost poljskog vodnog kapaciteta (Richards, L. A., 1941) je 31.3% v/v., a vlažnost venuća 14.3% v/v. Zalihe biljkama produktivne vlage u sloju zemljišta od 0–100 cm iznose oko 170 mm što po klasifikaciji Vadjunin & Korchagina (1973) pokazuje da su zalihe vlage veoma dobre.

Za ogledna istraživanja korišćena je rana sorta soje Wendy, koja spada u prvu grupu zrenja. Setva soje obavljena je 27. aprila 2023. godine sa gustom setve od 480.000 biljaka po hektaru. Tokom vegetacione sezone bila je primenjena uobičajena agrotehnika, a na kraju sezone, prinos je kvantitativno analiziran prostorno, u tri ponavljanja.

Praćenje vlažnosti zemljišta i proračun evapotranspiracije

Soil moisture monitoring and evapotranspiration calculation

Kako bi se kontinuirano pratila vlažnost zemljišta, ocenile potrebe biljaka za vodom i identifikovao potencijalni vodni stres, postavljene su TDR (Time Domain Reflectometry) sonde za određivanje vlažnosti zemljišta na dubini 0-30 cm, u tri ponavljanja. Pored toga, u blizini postavljenih sonde uzimani su uzorci za određivanje vlažnosti zemljišta gravimetrijskom metodom u intervalu od 15 dana, radi kalibracije i kontrolisanja rada sonde.

Za potrebe istraživanja dnevne vrednosti evapotranspiracije soje određene su na osnovu standardne FAO Penman-Monteith metode za obračun referentne evapotranspiracije (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Gde je: ET_o – referentna evapotranspiracija ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$), R_n – neto radijacija sa površine useva ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dan}^{-1}$), G – energija utrošena na zagrevanje zemljišta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dan}^{-1}$), T – temperatura vazduha merena na 2 m visine ($^{\circ}\text{C}$), u_2 – brzina vetra merena na 2 m visine ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_s – saturisani napon vodene pare (kPa), e_a – stvarni napon vodene pare (kPa), $e_s - e_a$ – deficit napona vodene pare (kPa), Δ – nagib krive napona vodene pare ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$), γ – psihrometerska konstanta ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$).

Evapotranspiracija useva u standardnim uslovima (ET_c) predstavlja proizvod koeficijenta kulture (K_c) u kom su sadržane karakteristike useva i referentne evapotranspiracije (ET_o) u kojoj su uzeti u obzir različiti klimatski uslovi:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c$$

Međutim, ovakav način izračunavanja potreba useva za vodom objedinjuje procese evaporacije i transpiracije. Da bi se precizno odredila potrošnja vode u realnom vremenu, potrebno je posebno posmatrati procese evaporacije i transpiracije. Standardni Kc koeficijent zamenjuje se zbirom bazalnog koeficijenta kulture (Kcb) i koeficijenta evaporacije sa zemljišta (Ke) i računa se prema formuli:

$$Kc = Kcb + Ke$$

Stoga, dnevne vrednosti evapotranspiracije useva u standardnim uslovima izračunate su prema formuli:

$$ETc = ET_0 \cdot (Kcb + Ke)$$

Za određivanje Ke izračunat je proračun dnevnog bilansa vode u zemljištu, tako što se merio sadržaj vlage koji je preostao u gornjem sloju zemljišta, po FAO-56 formuli:

$$Ke = Kr \cdot (Kc_{max} - Kcb) \leq f_{ew} \cdot Kc_{max}$$

Gde je: Kc_{max} – maksimalna vrednost Kc nakon kiše ili navodnjavanja, Kr – koeficijent smanjenja isparavanja koji zavisi od akumulirane količine iscrpljene vode, f_{ew} – frakcija zemljišta koja je izložena sunčevoj radijaciji iz koje isparava voda (0.01–1.0).

Kr, bezdimenzionalan koeficijent koji zavisi od isparavanja vode iz površinskog sloja zemljišta ($Kr = 1$, kada je $D_{e,i-1} \leq REW$):

$$Kr = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW}$$

Gde je: $D_{e,i-1}$ – akumulirana količina isparene vode iz površinskog sloja zemljišta na kraju dana i-1 (prethodnog dana) (mm), TEW – maksimalna količina vode koja može da ispari iz površinskog sloja zemljišta kada je $Kr = 0$ (TEW = ukupno isparljiva voda (mm)), REW – lako ispariva količina vode na kraju faze 1 (REW = lakoispraiva voda (mm)).

Maksimalna količina vode koja može ispariti iz zemljišta kada je površinski sloj prvobitno nakvašen do poljskog vodnog kapaciteta (mm) izračunata je po formuli:

$$TEW = 1000 \cdot (\theta_{fc} - 0.5\theta_{wp}) \cdot Ze$$

Gde je: θ_{fc} - vlažnost zemljišta pri poljskom vodnom kapacitetu ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), θ_{wp} - vlažnost venuća ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), Z_e - dubina površinskog sloja zemljišta iz kog lako isparava voda (0.10-0.15 m).

Ukupna količina vode koja je isparila iz površinskog sloja zemljišta na kraju dana $i-1$ (mm) određena je po formuli:

$$D_{e,i-1} = ET_o \cdot K_e - (P_i + I_i + DP_i)$$

Gde je: P_i – količina padavina u toku dana (mm), I_i – norma zalivanja u danu i koja se infiltrira u zemljište (mm), DP_i – duboka perkolacija u toku dana (mm).

Kako na oglednoj parceli nije bilo primene navodnjavanja, moglo je doći do smanjenja stope stvarne evapotranspiracije u odnosu na ET_c , stoga su izračunate dnevne vrednosti evapotranspiracije u uslovima koji se ne podudaraju sa standardnim uslovima, preko koeficijenta stresa usled nedostatka vode:

$$ET_a = ET_o \cdot (K_s \cdot K_{cb} + K_e)$$

Gde se K_s – koeficijent stresa usled nedostatka vode, koji zavisi od raspoložive vode u zoni korena računa kao:

$$K_s = \frac{TAW - D_{R,i-1}}{TAW - RAW}$$

Gde je: $D_{R,i-1}$ potrošena količina vode iz zone korenovog sistema na kraju dana $i-1$ (mm), TAW – ukupna raspoloživa voda u zoni korena (mm), a RAW – lako dostupna voda u zoni korena (mm).

Kada je $D_{R,i-1} \leq RAW$, $K_s = 1.0$.

Ukupno raspoloživa voda biljkama (TAW) predstavlja količinu vode koja se drži kapilarnim silama od poljskog vodnog kapaciteta (-0,033 MPa) do vlažnosti venuća (1.5 MPa), izračunava se preko formule:

$$TAW = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \cdot Z_r$$

Gde je Z_r dubina korena (m).

Voda je teorijski dostupna sve do tačke trajnog venuća, međutim, kako se sadržaj vode u zemljištu smanjuje, voda postaje čvršće vezana za zemljište i teže se usvaja od strane biljaka. Kada sadržaj vode u zemljištu padne ispod praga tolerancije za svaku biljnu vrstu, voda u zemljištu se više ne može dovoljno brzo transportovati prema korenu kako bi zadovoljila transpiracionu potražnju, i biljka počinje da doživljava stress (Allen et al., 1998). Deo ukupne raspoložive vode koji je biljci lako dostupan, odnosno koji može usvojiti iz zone korena bez ulaska u stres, predstavlja lako dostupnu vodu:

$$RAW = p \cdot TAW$$

Gde je p – prosečna frakcija ukupno raspoložive vode u zoni korena (TAW) koja može biti iscrpljena pre nego što se pojavi stres usled nedostatka vlage. Za soju je usvojen prag tolerancije $p = 0,55$ (Doorenbos and Kassam 1979).

Izračunavanje $D_{R,i-1}$ zahteva dnevni bilans vode u zoni korena:

$$D_{R,i} = D_{R,i-1} - P_i - I_i - DP_i + ET_{C,i}$$

Gde su: $D_{R,i}$ i $D_{R,i-1}$ kumulativne dubine transpiracije u zoni korena na kraju dana i i $i-1$ (mm), a $ET_{C,i}$ evapotranspiracija useva na dan i (mm).

Vegetacioni indeksi određeni pomoću multispektralnih senzora

Vegetation indices determined using multispectral sensors

Određivanje vrednosti vegetacionih indeksa obuhvaćeno je merenjem ručnim multispektralnim aktivnim senzorom, pod nazivom “Plant-O-Meter” (POM) koji je zasnovan na specijalno dizajniranom multispektralnom izvoru koji integriše šest izvora svetlosti najindikativnijih talasnih dužina u jednom optičkom modulu. Obuhvata šest odvojenih talasnih dužina iz oblasti blisko infracrvenog (NIR1 od 810 nm i NIR2 od 940 nm), crvenog (Red: 657 nm), zelenog (Green: 528 nm), plavog (Blue: 455 nm) i ivice crvenog spektra (RedEdge: 740 nm) (Kitić et al., 2019). Na ovaj način uređaj pruža mogućnost za izračunavanje više od 30 različitih vegetacionih indeksa koji se dobijaju primenom odgovarajućih matematičkih formula. Merenja su bila izvršena tako što je uređaj bio postavljen na udaljenosti od 50 cm od biljaka. Tokom vegetacije fenološka osmatranja i merenja su vršena u sledećim fazama: fazi početka intenzivnog rasta V4

(13.06.2023.), fazi početka cvetanja R1 (28.06.2023.), fazi početka formiranja prvih mahuna R3 (12.07.2023.) i fazi formiranja mahuna R4 (27.07.2023.).

Na osnovu pojedinačnih spektralnih dužina i vrednosti vegetacionih indeksa tokom vegetacije praćeno je stanje useva. Uporedo, tokom prethodno navedenih faza, vršena su i snimanja bespilotnom letelicom DJI Phantom 4 Multispectral (DJI P4) na visini od 50 m. Ova bespilotna letelica kombinuje standardnu RGB kameru sa multispektralnim nizom 5 kamera koje pokrivaju opseg blisko infracrvenog (NIR: 840 nm ± 26 nm), crvenog (Red: 650 nm ± 16 nm), zelenog (Green: 560 nm ± 16 nm), plavog (Blue: 450 nm ± 16 nm) i ivice crvenog dela spektra (Red Edge: 730 nm ± 16 nm), pružajući na taj način prostorne informacije o stanju, kako biljaka, tako i zemljišta. Na osnovu prikupljenih podataka sa pomenutog optičkog senzora i bespilotne letelice sa multispektralnom kamerom, određene su vrednosti Indeksa normalizovane razlike vegetacije (NDVI), Pojačanog indeksa vegetacije (EVI) i Zelenog indeksa normalizovane razlike vegetacije (GNDVI) prema sledećim formulama:

Tabela 1. Vegetacioni indeksi korišćeni za praćenje stanja useva.

Table 1. Vegetation indices used for crop condition monitoring.

Indeks	Jednačina	Referenca
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Wang et al., 2022
EVI	$EVI = 2.5 \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 2.4RED + 1} \right)$	Marcial-Pablo et al., 2021
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	Mwinuka et al., 2021

Indeks lisne površine (LAI) koji predstavlja jednostranu površinu zelenih listova po jedinici površine zemljišta, određen je tokom prethodno pomenutih faza rasta i razvoja soje, pomoću laserskog merača površine lista. LAI (m²/m²) je izračunat preko formule:

$$LAI = \frac{Leaf\ area}{Ground\ area}$$

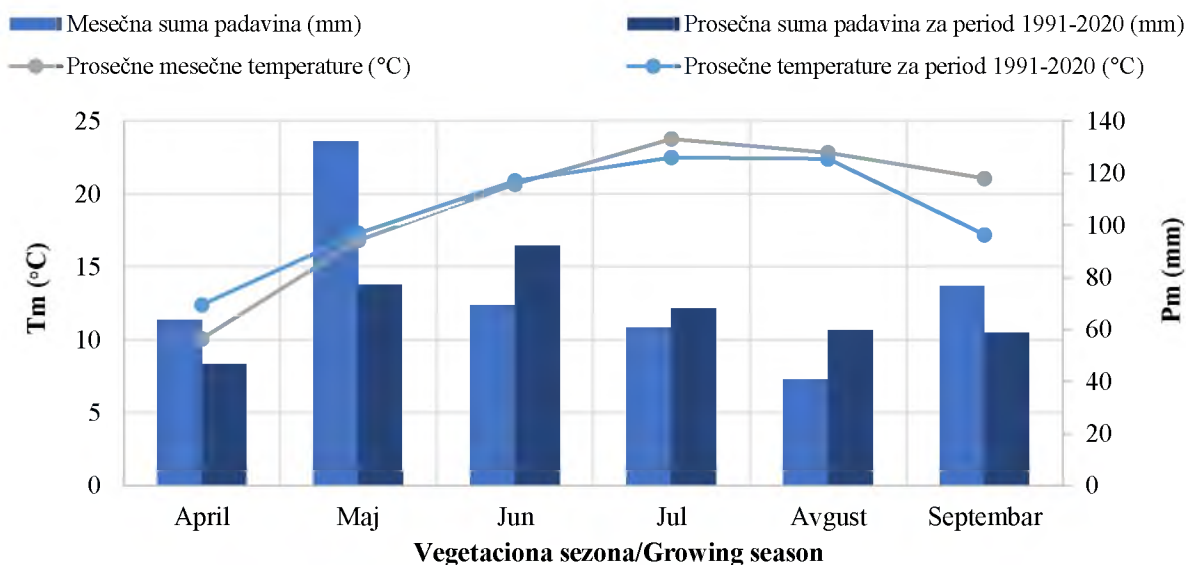
Međuzavisnost posmatranih parametara vegetacionih indeksa i evapotranspiracije, vlažnosti zemljišta i prinosa ustanovljena je izračunavanjem Pirsonovih koeficijena korelacije.

Statistička obrada rezultata je urađena u računarskom program StatSoft Statistica for Windows, verzija 13.2 (Dell Inc., USA).

Rezultati i diskusija

Results and discussion

U toku ogleđa, najviša prosečna temperatura vazduha zabeležena je u julu, dostigavši 23.7 °C, dok je najniža temperatura zabeležena u aprilu, iznosila 10 °C. Količina padavina varirala je u rasponu od 132.4 mm u maju do 40.8 mm u avgustu. Tokom aprila, maja i septembra, padavine su bile iznad višegodišnjeg proseka, dok su prosečne dnevne temperature iznad višegodišnjeg proseka bile tokom jula, avgusta i septembra (grafik 1). Ukupna količina padavina tokom vegetacione sezone iznosila je 384.4 mm, a raspored padavina tokom sezone bio je relativno neujednačen.

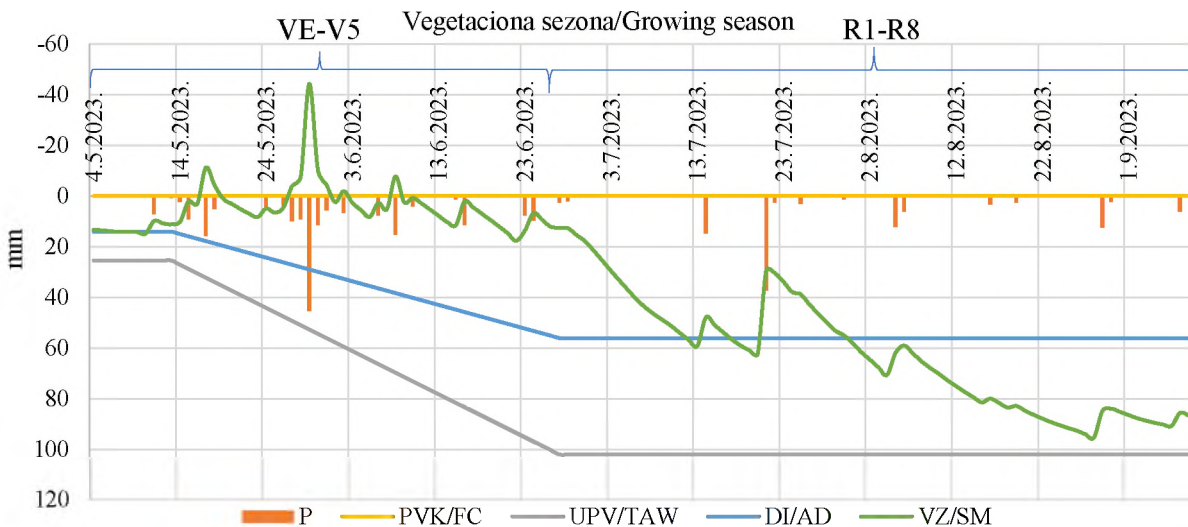


Grafik 1. Prosečne temperature vazduha T_m (°C) i mesečna suma padavina P_m (mm) tokom vegetacione sezone uz poređenje sa prosečnim vrednostima za period od 1991. do 2020. godine.

Figure 1. Average air temperature T_m (°C) and monthly precipitation sum P_m (mm) during the growing season compared to the average values for the period from 1991 to 2020.

Na grafiku 2 prikazan je trend vlažnosti zemljišta tokom perioda rasta soje, uz dodatne vrednosti ukupno pristupačne vode (UPV/TAW) tokom vegetacione sezone. Nakon završetka faze intenzivnog rasta, vrednost UPV dostiže konstantnu vrednost od 102 mm, što odražava kapacitet zemljišta za vodu u zoni glavne mase korenovog sistema. Takođe, prikazani su dozvoljeni nivo

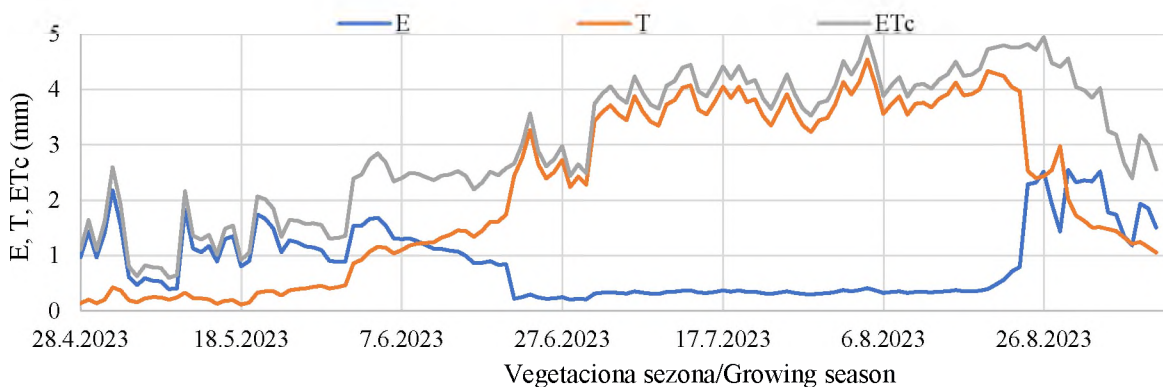
isušivanja od 55% i poljski vodni kapacitet. Iz grafika se jasno uočava da je na početku vegetacione sezone, tokom V1 faze, vlažnost zemljišta bila na granici dozvoljenog isušivanja, što je rezultiralo koeficijentom stresa u rasponu od 0.60 do 0.84. Od polovine maja, usled visokih padavina, zabeležen je nagli porast vlažnosti zemljišta, zadržavajući se iznad poljskog vodnog kapaciteta. Potrošnja vode bila je manja od priliva vode dospele usled obilnih padavina od 132.8 mm (grafik 1). Tokom faze početka cvetanja (R1) i cvetanja (R2), zabeležena su dva perioda kada je vlažnost zemljišta opala ispod vrednosti dozvoljenog isušivanja, međutim, usled padavina, ove vrednosti su ubrzo dostigle vrednosti približne poljskom vodnom kapacitetu. Koeficijent stresa u tom periodu kretao se od 0.52 do 0.88. Tokom faze formiranja mahuna (R4), sadržaj vlage kretao se ispod zone dozvoljenog isušivanja, usled čega je usev bio izložen stresu u najosetljivijoj fazi razvića. Sadržaj vlage se konstantno zadržavao ispod vrednosti dozvoljenog isušivanja, te se koeficijent stresa tokom tog perioda kretao u opsegu od 0.14 do 0.92. Iako je tokom septembra zabeležena suma padavina od 76.6 mm, padavine su bile neravnomerno raspoređene, te nisu uspele da nadoknade potrebe useva soje za vodom.



Grafik 2. Padavine (P), poljski vodni kapacitet (PVK), ukupno pristupačna voda (UPV), dozvoljeno isušivanje (DI), i promene vlažnosti zemljišta (VZ) tokom vegetacione sezone.

Figure 2. Precipitation (P), field capacity (FC), total available water (TAW), allowable depletion (AD), and changes in soil moisture (SM) during the growing season.

Na grafiku 3 prikazane su vrednosti evaporacije, transpiracije i evapotranspiracije soje tokom vegetacione sezone. Na početku vegetacionog perioda, usled dostupnosti vode u površinskom sloju i većeg udela frakcije solarne radijacije koja je dospevala na golo zemljište, voda se pretežno gubila isparavanjem sa zemljišta. Kako je ova frakcija opadala tokom vremena i kada je soja krenula da zasenjuje zemljište, proces transpiracije postao je dominantan, pa sumarna vrednost gubitaka vode transpiracijom tokom vegetacione sezone iznosila je 295.3 mm (tabela 2). Nagli skokovi evaporacije tokom vegetacionog perioda javili su se odmah posle kiša, kada je voda sa površine zemljišta lako isparavala. Kako se zemljište isušivalo i zasenjivalo, tako se i koeficijent evaporacije smanjivao, tako da sumarna vrednost evaporacije tokom vegetacione sezone iznosi 116.9 mm (tabela 2).



Grafik 3. Transpiracija (T), evaporacija (E) i evapotranspiracija useva (ETc) tokom vegetacione sezone.

Figure 3. Transpiration (T), Evaporation (E) and crop evapotranspiration (ETc) during the growing season.

Tabela 2. Prikaz sumarne transpiracije, evaporacije, evapotranspiracije useva i prinosa.

Table 2. Sum of transpiration, evaporation, crop evapotranspiration and yield.

ΣT (mm)	ΣE (mm)	ΣETc (mm)	ΣETa (mm)	Prinos (kg·ha ⁻¹)
295.25	116.91	412.16	299.44	4800

Prosečan prinos zrna soje na oglednoj parceli bio je 4800 kg·ha⁻¹ (tabela 1), dok je tokom 2012. na polju u Bačkom Petrovcu u uslovima prirodne vlažnosti postignut prinos od 3650 kg·ha⁻¹, međutim padavine su iznosile svega 221.5 mm (Popović et. al., 2015). Slično našim rezultatima, u trogodišnjem istraživanju Maksimović et. al., 2005 su utvrdili da se utrošak vode na

evapotranspiraciju soje u kontrolnoj varijanti, odnosno u uslovima prirodne vlažnosti kretao u intervalu od 390 do 524 mm, dok se prosečan prinos u uslovima navodnjavanja povećao za 1000–1300 kg·ha⁻¹. Tokom svog istraživanja (Pejić et al., 2011) došli su do sličnih rezultata, gde je utvrđeno da se tokom desetogodišnjeg perioda stvarna evapotranspiracija kretala od 170 do 450 mm, dok je prinos varirao u opsegu od 2442 do 5170 kg·ha⁻¹ na zemljištu tipa černozem, na Rimskim Šančevima.

Koeficijenti korelacije analizirani su između vegetacionih indeksa dobijenih preko ručnog multispektralnog senzora (POM) i bespilotne letelice (UAV), stvarne evapotranspiracije, vlažnosti zemljišta i prinosa tokom prethodno pomenutih faza rasta i razvoja soje (tabela 2). Cilj je bio da se identifikuju faze razvoja u kojima su određeni indeksi povezani sa prinosom, kao i identifikacija ključnih indeksa i faza razvoja koji su najpouzdaniji za procenu prinosa i obezbeđenost useva vodom. Tokom faze intenzivnog rasta (V4), NDVI-UAV, EVI-UAV i GNDVI-UAV pokazali su visoko značajnu, odnosno značajnu pozitivnu korelaciju sa prinosom ($r = 0.96^{**}$, $r = 0.94^{**}$, $r = 0.86^{*}$). Slične rezultate gde je analiza pokazala da regioni sa najvišim vrednostima NDVI-a imaju potencijal za postizanje najvećeg prinosa soje, utvrdili su Da Silva et.al (2020). GNDVI-UAV je takođe, uz GNDVI-POM iskazao značajne pozitivnu korelaciju sa vrednostima ETa i vlažnosti zemljišta. Slične rezultate na području Srbije (Stara Pazova) ostvarili su Lipovac et al. (2022) na navodnjavanom pasulju, gde je ustanovljena visoko značajna pozitivna korelacija između NDVI, GNDVI i transpiracije. Tokom faze cvetanja (R1), GNDVI-POM pokazao je značajne pozitivne korelacije sa vrednostima svih parametara, dok je GNDVI-UAV pokazao značajne pozitivne korelacije sa vrednostima stvarne evapotranspiracije i vlažnosti zemljišta. Tokom faze početka formiranja mahuna (R3), GNDVI-UAV je ponovo pokazao značajnu pozitivnu korelaciju sa prinosom ($r = 0.86^{*}$), dok je NDVI-POM pokazao značajne pozitivne korelacije sa vrednostima stvarne evapotranspiracije i vlažnosti zemljišta. Tokom faze formiranja mahuna (R4), EVI-UAV pokazao je visoko značajne pozitivne korelacije sa vrednostima stvarne evapotranspiracije, vlažnosti zemljišta i prinosom ($r = 0.94^{**}$, $r = 0.96^{**}$, $r = 0.89^{**}$), dok su NDVI-POM i GNDVI-POM pokazali značajne pozitivne korelacije sa svim parametrima (tabela 2). Tang et al. (2023) ispitujući korelaciju između vegetacionih indeksa i vlažnosti zemljišta na području severozapadne Kine utvrđuju da se EVI pokazao kao jedan od indeksa koji je osetljiv na promene sadržaja vlage u zemljištu, sa koeficijentom korelacije većim od 0.63. Do sličnih rezultata na području Perua došli

su Saravia et al. (2023) ispitujući korelacije između prinosa pasulja i vegetacionih indeksa dobijenih preko bespilotne letelice, gde je analiza pokazala visoko značajne pozitivne korelacije između prinosa, NDVI, GNDVI i EVI ($0.544 > r > 0.470$).

Tabela 3. Koeficijenti korelacije između vrednosti vegetacionih indeksa tokom vegetacione sezone i stvarne evapotranspiracije, vlažnosti zemljišta i prinosa (n=6).

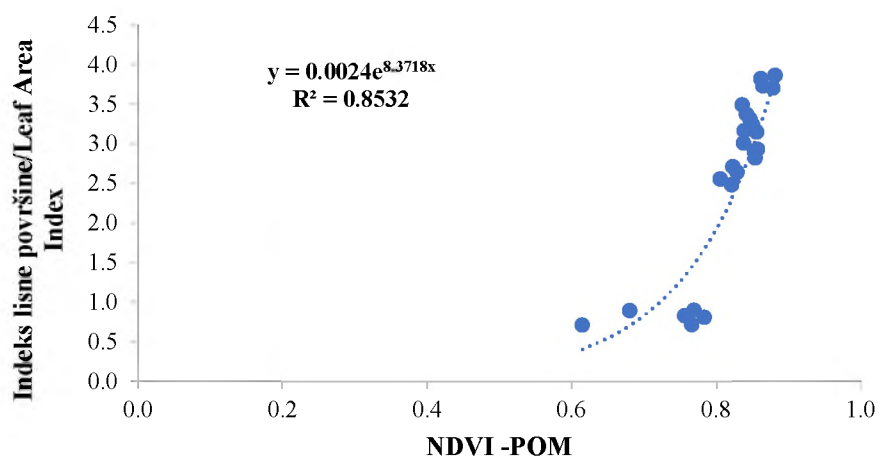
Table 3. Correlation coefficient between vegetation indices values during the growing season and actual evapotranspiration, soil moisture and yield (n=6).

Fenofaza	Varijable	NDVI-POM	NDVI-UAV	EVI-POM	EVI-UAV	GNDVI-POM	GNDVI-UAV
V4	ETa	0.77 ^{ns}	0.72 ^{ns}	0.79 ^{ns}	0.49 ^{ns}	0.82 [*]	0.78 [*]
	Vlažnost zemljišta	0.79 ^{ns}	0.78 ^{ns}	0.76 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.84 [*]	0.84 [*]
	Prinos	0.68 ^{ns}	0.96 ^{**}	0.70 ^{ns}	0.94 ^{**}	0.73 ^{ns}	0.86 [*]
R1	ETa	0.73 ^{ns}	0.83 ^{ns}	0.87 ^{ns}	-0.30 ^{ns}	0.85 [*]	0.90 [*]
	Vlažnost zemljišta	0.78 ^{ns}	0.73 ^{ns}	0.87 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.86 [*]	0.89 [*]
	Prinos	-0.23 ^{ns}	0.64 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.50 ^{ns}	0.89 [*]	0.49 ^{ns}
R3	ETa	0.86 [*]	0.19 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.58 ^{ns}	0.26 ^{ns}
	Vlažnost zemljišta	0.85 [*]	0.21 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.73 ^{ns}	0.46 ^{ns}
	Prinos	0.43 ^{ns}	-0.55 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.56 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.86 [*]
R4	ETa	0.83 [*]	-0.67 ^{ns}	0.70 ^{ns}	0.94 ^{**}	0.81 [*]	0.33 ^{ns}
	Vlažnost zemljišta	0.90 [*]	-0.58 ^{ns}	0.65 ^{ns}	0.96 ^{**}	0.89 [*]	0.60 ^{ns}
	Prinos	0.82 [*]	-0.72 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.89 ^{**}	0.90 [*]	-0.82 ^{ns}

ns: nema značaja (non-significant); *: značajno za nivo $P < 0.05$ (significant at $P < 0.05$ level); **: veoma značajno za nivo $P < 0.01$ (highly significant at $P < 0.01$ level).

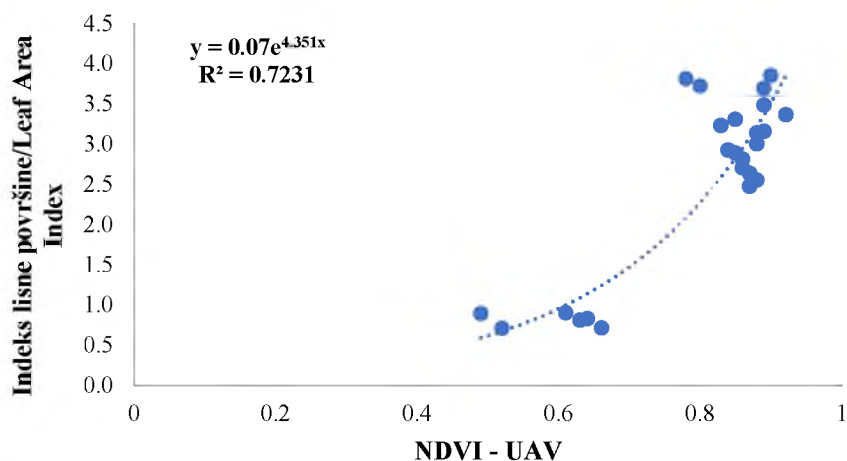
Tokom različitih faza rasta i razvoja soje, utvrđen je rastući trend indeksa lisne površine (LAI) koji je za faze V4, R1, R2, R3 imao zabeležene prosečne vrednosti od: 0.80, 2.46, 3.85 i 3.40, respektivno (grafik 4). Vrednosti LAI su u skladu sa rezultatima dobijenim i u drugim delovima sveta (Dubrovin et al., 2022). Analizom odnosa između LAI i NDVI, dobijenih korišćenjem ručnog multispektralnog senzora i bespilotne letelice, uočena je pozitivna korelaciona povezanost (Slika 4 i 5). Odnos između biomase i NDVI je takav da veće vrednosti LAI često rezultiraju većim vrednostima NDVI, jer veća biomasa dovodi do intenzivnije fotosinteze i zdravije vegetacije, što se može objasniti činjenicom da se više absorbuje i manje reflektuje solarna energija. Koeficijent determinacije (R^2) između LAI i NDVI dobijenog preko ručnog multispektralnog senzora i NDVI dobijenog preko bespilotne letelice iznosio je 0.85, odnosno

0.72. Do sličnih rezultata u svom istraživanju došli su Bajocco et al. (2022) koji su za pšenicu pretežno koristili eksponencijalne jednačine. Ovi eksponencijalni oblici su pokazali bolje rezultate sa višim R^2 vrednostima ($R^2 > 0.5$). Kim et al. (2012) koristili su satelitske snimke za izračunavanje NDVI i primenili modele za korelaciju NDVI sa LAI merenim podacima. Njihovi rezultati su pokazali da su ekspanlinearni modeli pružili visoke tačnosti u proceni LAI kod soje, dok su slike sa višom prostornom rezolucijom bile značajno korisnije za precizno određivanje LAI. Pozitivnu korelaciju povezanost između LAI i NDVI uočili su u svojim istraživanjima i Lee et al. (2017), dok je na području Srbije (Stara Pazova) Lipovac et al. (2022) takođe ostvario pozitivnu korelaciju između LAI i NDVI navodnjavanog pasulja, koja se kretala od 0.79 do 0.74. Mohlala et al. (2022) su u svom istraživanju utvrdili da se tokom letnjih meseci vrednosti NDVI kreću u opsegu od 0.6 do 0.8. Takođe, njihovi rezultati ukazuju na to da NDVI odražava reakciju vegetacije na promene u gradijentu vlage. Visoke vrednosti NDVI su u saglasnosti sa lakopristupačnom vodom u zemljištu, što je pogotovo izraženo u V4 fenofazi.



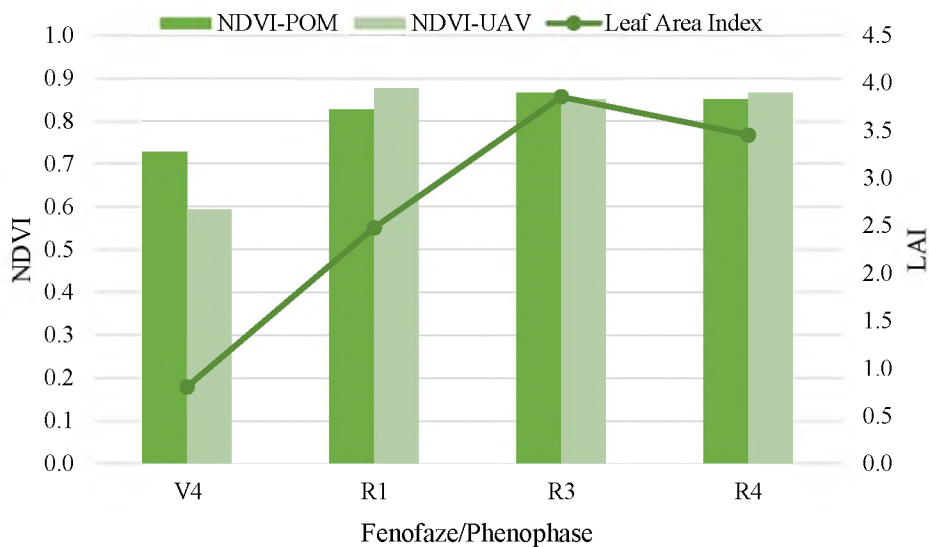
Grafik 4. Odnos LAI i NDVI dobijenog primenom ručnog multispektralnog senzora.

Figure 4. Relationship between LAI and NDVI obtained using a manual multispectral sensor.



Grafik 5. Odnos LAI i NDVI dobijenog primenom bespilotne letelice.

Figure 5. Relationship between LAI and NDVI obtained using a UAV.



Grafik 6. Prikaz LAI, vrednosti NDVI-POMi NDVI-UAV tokom vegetacione sezone.

Figure 6. LAI, NDVI-POM and NDVI-UAV values during the growing season.

Na grafiku 6 zapažene su najveće vrednosti NDVI tokom R1 faze, kada je prosečna vrednost bila 0.87. Slične rezultate u eksperimentu sa sojom u Rusiji, gde je maksimalna vrednost NDVI tokom R1 faze bila najveća (0.852) utvrdili su Stepanov et al. (2020).

Visoke vrednosti NDVI po proučavanim fazama razvoja soje ukazuju da je sorta soje Wendy relativno tolerantna na vodni stress, što se potvrđuje visokim ostvarenim prinosima (4800 kg ha⁻¹), što je gotovo jednako genetskom potencijalu (<https://www.rwa.co.rs/>).

Zaključak

Conclusion

Analizom međuzavisnih odnosa ustanovljene su značajne i visokoznačajne vrednosti korelacionih koeficijenata između vegetacionih indeksa, evapotranspiracije, vlažnosti zemljišta i prinosa. Pirsonovi koeficijenti korelacije dobijeni između vegetacionih indeksa, prinosa i agroklimatskih parametara iskazali su različite vrednosti u zavisnosti od faze razvoja useva i agroklimatskih uslova tokom sezone. Posebno je važno istaći da su vegetacioni indeksi tokom faze formiranja mahuna, kada je usev soje posebno osetljiv na nedostatak vode, pokazali povezanost sa stvarnom evapotranspiracijom, promenama vlažnosti zemljišta i prinosom. Ovi rezultati pružaju uvid u dostupnost vode za biljke i ukazuju na potencijalni stres. Kako se u istraživanju tokom jedne sezone pratila zavisnost prinosa soje i različitih agroklimatskih parametara, kao i vegetacionih indeksa u uslovima prirodnog vlaženja, korelacije koje nisu pokazale ponovljivost u različitim uslovima sredine i različitim fenofazama su u većoj zavisnosti od meteoroloških uslova gajenja. Rezultati sugerišu da ovi parametri mogu poslužiti kao pouzdani indikatori za praćenje stresnih uslova u gajenju soje što bi doprinelo pravovremenim intervencijama kako bi izbegli nedostatke i smanjili rizike u proizvodnji ove kulture.

U našem istraživanju, ističe se značaj korelacije između prinosa i indeksa NDVI i EVI dobijenih pomoću bespilotne letelice tokom faze intenzivnog rasta (V4), indeks GNDVI tokom faze početka cvetanja (R1), kao i NDVI i GNDVI dobijenih preko ručnog multispektralnog senzora i EVI dobijenog preko bespilotne letelice tokom faze obrazovanja mahuna (R4). Tokom različitih faza rasta i razvoja soje u uslovima prirodnog vlaženja, utvrđen je rastući trend indeksa lisne površine, dok je analizom odnosa između LAI i NDVI utvrđena pozitivna korelaciona povezanost. Podaci ovih istraživanja značajni su za buduću primenu multispektralnih senzora u proizvodnji soje i definisanju mera koje pogoduju ili eventualno štete proizvodnji soje za određene ili slične agroekološke uslove.

Zahvalnica

Acknowledgments

Istraživanje je podržano ANTARES projektom, koji je dobio finansiranje iz programa istraživanja i inovacija Horizont 2020 Evropske Unije u okviru ugovora o dodeli grantova SGA-CSA. Broj. 739570 u okviru FPA br. 664387 (<https://doi.org/10.3030/739570>). Autori izražavaju iskrenu zahvalnost kompaniji KITE d.o.o. (KITE Tehnologije), Srbija, na saradnji i velikodušnom deljenju svojih terenskih zapisa kako bi se obezbedili relevantni podaci u našem istraživanju.

Literatura

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Andrade, T. G., Andrade Junior, A. S. D., Souza, M. O., Lopes, J. W. B., & Vieira, P. F. D. M. J. 2022. Soybean yield prediction using remote sensing in southwestern Piauí state, Brazil. *Revista Caatinga*, 35, 105-116.
- Bajocco, S., Ginaldi, F., Savian, F., Morelli, D., Scaglione, M., Fanchini, D. & Bregaglio, S. U. M. 2022. On the use of NDVI to estimate LAI in field crops: Implementing a conversion equation library. *Remote Sensing*, 14(15), 3554.
- Da Silva, E. E., Baio, F. H. R., Teodoro, L. P. R., da Silva Junior, C. A., Borges, R. S., & Teodoro, P. E. 2020. UAV-multispectral and vegetation indices in soybean grain yield prediction based on in situ observation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100318.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper, 33, 257. Rome
- Dragovic, S., Maksimovic, L., Radojevic, V., & Cicmil, M. 2005. Irrigation requirements and their Effects on Crop Yields in Serbia and Montenegro. In ICID 21st European Regional Conference, Frankfurt (Oder) and Slubice—Germany and Poland, pp. 1-9.

- Dubrovin, K. N., Stepanov, A. S., & Aseeva, T. A. 2022. Application of LAI and NDVI to model soybean yield in the regions of the Russian Far East. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 949(1), 012030. IOP Publishing.
- Đukić, V., Balešević-Tubić, S., Đorđević, V., Dozet, G., Jaćimović, G., Tatić, M., Petrović, K. 2011. Prinos i semenski kvalitet soje u zavisnosti od uslova godine. Ratarstvo i povrtarstvo, 48(1), 137-142.
- Enger, H., Riehm, H. 1958. Die ammoniumlaktatessigsäure-methode zur bestimmung der leichtlöslichen phosphorsäure in karbonathaltigen böden. Agrochimica, 3(1), 49-65.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., Shao, G. 2012. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. J. For. Res. 32, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Kim, S. H., Hong, S. Y., Sudduth, K. A., Kim, Y., & Lee, K. 2012. Comparing LAI estimates of corn and soybean from vegetation indices of multi-resolution satellite images. Korean Journal of Remote Sensing, 28(6), 597-609.
- Kitić, G., Tagarakis, A., Cselyuszka, N., Panić, M., Birgermajer, S., Sakulski, D., & Matović, J. 2019. A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. Computers and Electronics in Agriculture, 162, 300-308.
- Kolarić, L., Ikanović, J., Popović, V., Živanović, L., Janković, S., Rakaščan, N. & Jevremov, B. 2023. Soybeans as a food and energy source. In Abstracts, 11th World Soybean Research Conference (WSRC 11), Soybean Research for Sustainable Development, Vienna, 18-23 June 2023, pp. 149-149. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU).
- Lee, B.; Kwon, H.; Miyata, A.; Lindner, S.; Tenhunen, J. 2017. Evaluation of a Phenology-Dependent Response Method for Estimating Leaf Area Index of Rice Across Climate Gradients. Remote Sensing, 9, 20. <https://doi.org/10.3390/rs9010020>
- Lipovac, A., Bezdan, A., Moravčević, D., Djurović, N., Ćosić, M., Benka, P., & Stričević, R. 2022. Correlation between Ground Measurements and UAV Sensed Vegetation Indices for Yield Prediction of Common Bean Grown under Different Irrigation Treatments and Sowing Periods. Water, 14(22), 3786.
- Maksimović, L., Pejić, B., Milić, S., & Radojević, V. 2005. Efekat navodnjavanja na evapotranspiraciju i prinos soje. Vodoprivreda, 37(4-6), 239-244.

- Mandić, V., Bijelić, Z., Krnjaja, V., Simić, A., Ružić-Muslić, D., Dragičević, V., & Petričević, V. 2017. The rainfall use efficiency and soybean grain yield under rainfed conditions in Vojvodina. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 33(4), 475-486.
- Mandić, V., Krnjaja, V., Tomić, Z., Bijelić, Z., Simić, A., Đorđević, S. & Gogić, M. 2015. Effect of water stress on soybean production. In *Proceedings of the 4th International Congress New Perspectives and Challenges of Sustainable Livestock Production October 7–9, 2015* (pp. 405-414). Belgrade: Institute for Animal Husbandry.
- Marcial-Pablo, M. D. J., Ontiveros-Capurata, R. E., Jiménez-Jiménez, S. I., & Ojeda-Bustamante, W. 2021. Maize crop coefficient estimation based on spectral vegetation indices and vegetation cover fraction derived from UAV-based multispectral images. *Agronomy*, 11(4), 668.
- Meseldžija, M., Rajković, M., Dudić, M., Vranešević, M., Bezdan, A., Jurišić, A., & Ljevnaić-Mašić, B. 2020. Economic feasibility of chemical weed control in soybean production in Serbia. *Agronomy*, 10(2), 291.
- Mohlala, D. B., Stričević, R., Gregorić, E., & Životić, L. 2022. Просторне и временске промене у снабдевеност биљака водом применом NDVI у сливовима Тиње и Козлице. *Zemljiste i biljka*, 71(2).
- Muruganatham, P., Wibowo, S., Grandhi, S., Samrat, N. H., & Islam, N. 2022. A systematic literature review on crop yield prediction with deep learning and remote sensing. *Remote Sensing*, 14(9), 1990.
- Mwinuka, P. R., Mbilinyi, B. P., Mbungu, W. B., Mourice, S. K., Mahoo, H. F., & Schmitter, P. 2021. The feasibility of hand-held thermal and UAV-based multispectral imaging for canopy water status assessment and yield prediction of irrigated African eggplant (*Solanum aethopicum* L). *Agricultural Water Management*, 245, 106584.
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy journal*, 104(5), 1336-1347.
- Pejić, B., Bošnjak, Đ., Mačkić, K., Rajić, M., Josipović, M., Jug, I., & Maksimović, L. 2012. Yield and water use efficiency of irrigated soybean in Vojvodina, Serbia. *Ratarstvo i povrtarstvo*, 49(1), 80-85.

- Pejić, B., Maksimović, L., Cimpeanu, S., Bucur, D., Milić, S., & Ćupina, B. 2011. Response of soybean to water stress at specific growth stages.
- Popović, V., Miladinović, J., Vidić, M., Vučković, S., Dolijanović, Ž., Ikanović, J. & Kolarić, L. 2015. Drought: Limiting factor in soybean production; the effect of irrigation on yield of soybean: *Glycine max*. Zbornik naučnih radova Instituta PKB Agroekonomik, 21(1-2), 11-20.
- Richards, L. A. 1941. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil science*, 51(5), 377-386.
- Rodigheri, G., Fontana, D. C., Schaparini, L. P., Dalmago, G. A., & Schirmbeck, J. 2020. Net primary productivity and dry matter in soybean cultivation utilizing datas of NDVI multi-sensors. In 2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS) (pp. 115-120). IEEE.
- Saravia, D., Valqui-Valqui, L., Salazar, W., Quille-Mamani, J., Barboza, E., Porrás-Jorge, R. & Arbizu, C. I. 2023. Yield prediction of four bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars using vegetation indices based on multispectral images from UAV in an arid zone of Peru. *Drones*, 7(5), 325.
- SRPS 7150-1 1990. Određivanje sadržaja amonijaka. Metoda pomoću Nessler-ovog reagensa
- Stepanov, A., Dubrovin, K., Sorokin, A., & Aseeva, T. 2020. Predicting soybean yield at the regional scale using remote sensing and climatic data. *Remote Sensing*, 12(12), 1936.
- Tang, Z., Zhang, W., Wang, X., Xiang, Y., & Chen, J. 2023. Study on soil moisture content in soybean root zone based on UAV multispectral remote sensing. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 6(1).
- Tyurin, I. V., & Kononova, M. M. 1934. On a new method for determining soil nitrogen requirements. *Proceedings of the Soil Institute named after VV Dokuchaev*, 10(4), 49-56.
- USDA. 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0; Burt, R., Staff, S.S., Eds.; U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA.
- Vadjunina, Korchagina, 1973 – Vadjunina A.F., Korchagina Z.A. 1973. Methods research on physical properties of soils and primers. *Vyssshaya Shkola: Moscow*, 400 p.

- Wang, N., Guo, Y., Wei, X., Zhou, M., Wang, H., & Bai, Y. 2022. UAV-based remote sensing using visible and multispectral indices for the estimation of vegetation cover in an oasis of a desert. *Ecological Indicators*, 141, 109155.
- Worku, M., & Astatkie, T. 2011. Row and plant spacing effects on yield and yield components of soya bean varieties under hot humid tropical environment of Ethiopia. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(1), 67-74.
- Xue, J., & Su, B. 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017.
- Zerihun, A., & Haile, D. 2017. The effect of organic and inorganic fertilizers on the yield of two contrasting soybean varieties and residual nutrient effects on a subsequent finger millet crop. *Agronomy*, 7(2), 42.
- Zhang, X., Zhao, J., Yang, G., Liu, J., Cao, J., Li, C. & Gai, J. 2019. Establishment of plot-yield prediction models in soybean breeding programs using UAV-based hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing*, 11(23), 2752.
- <https://www.rwa.co.rs/> (dostupno 29.04.2024.)
- <https://www.fao.org/faostat>; (dostupno 29.04.2024.)

Using a manual multispectral sensor and UAV in monitoring soybean development and productivity under rainfed conditions

Nevena Stevanović^{1*}, Nikola Stanković¹, Nataša Ljubičić¹, Mirjana Vukosavljev¹, Aleksa Lipovac², Irina Marina³, Ružica Stričević²

¹University of Novi sad, BioSense Institute, Dr Zorana Đinđića 1, 21000 Novi Sad, Serbia

²University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Nemanjina 6, Belgrade 11080, Serbia

³Institute of Agriculture Economics, Volgina 15, Belgrade 11060, Serbia

*Contact author: Nevena Stevanović, nevena.stevanovic@biosense.rs

Abstract

Soybean (*Glycine max* L.) is one of the leading cultivated crops globally. Although the region of Vojvodina is favorable for soybean production, the climate, especially high temperatures and uneven distribution of precipitation, represents a major limiting factor. The aim of this study is to investigate the correlation between soybean yield, water stress levels, and vegetation indices obtained using a handheld multispectral sensor and a drone under natural moisture conditions on a test plot in Čenej, Vojvodina. The results showed a significant correlation between vegetation indices with evapotranspiration, soil moisture changes, and soybean yield. During the intensive growth phase (V4), NDVI-UAV, EVI-UAV, and GNDVI-UAV showed highly significant positive correlations with yield ($r=0.96^{**}$, $r=0.94^{**}$, $r=0.86^{*}$). During the flowering phase (R1), GNDVI-POM had significant positive correlations with all analyzed parameters, while GNDVI-UAV had significant correlations with evapotranspiration and soil moisture. During the pod formation phase (R3), GNDVI-UAV again showed a significant correlation with yield ($r=0.86^{*}$), while NDVI-POM had significant correlations with evapotranspiration and soil moisture. During the pod filling phase (R4), EVI-UAV showed highly significant positive correlations with evapotranspiration, soil moisture, and yield ($r=0.94^{**}$, $r=0.96^{**}$, $r=0.89^{**}$). These results are useful for the application of multispectral sensors in detecting soybean water availability and improving production under natural moisture conditions.

Keywords: soybean, multispectral sensor, UAV, vegetation indices, soil moisture

Received 08.05.2024

Revised 03.08.2024

Accepted 07.08.2024